

0- 791186

На правах рукописи

Мещеряков Александр Валерьевич

**Структура аккреционного диска с облучением
в тесных двойных системах с нейтронными звездами**

01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук**

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Cyrillic letters, likely the author's name.

Москва, 2011

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор
доктор физико-математических наук

Шакура Николай Иванович (ГАИШ)
Ревнивец Михаил Геннадьевич (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
доктор физико-математических наук

Нагирнер Дмитрий Исидорович (СПбГУ)
Чугай Николай Николаевич (ИНАСАН)

Ведущая организация:

Главная астрономическая обсерватория РАН, г.Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 23 декабря 2011 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 в конференц-зале Института космических исследований РАН по адресу: Москва, 117997, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 23 ноября 2011 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000688631

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.113.02
кандидат физико-математических наук

А.Ю. Ткаченко

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Аккреционные диски играют важную роль в наблюдательных проявлениях таких разных астрономических объектов как протозвезды, тесные двойные системы с компактными звездными остатками, активные ядра галактик.

Двойные звезды представляют собой редкий класс астрофизических объектов, чьи основные параметры (такие как орбитальный период, массы звезд, размеры орбиты) могут быть измерены из наблюдений (в первую очередь оптических). Благодаря этому аккреция вещества в этих объектах может быть изучена наиболее детально.

В маломассивных рентгеновских двойных системах (ММРД), которые являются предметом исследования в настоящей диссертационной работе, главным источником оптической светимости являются облученные рентгеновскими фотонами внешние части аккреционного диска вокруг компактного объекта, а излучение звезды-компаньона практически не заметно на этом фоне. ММРД представляют замечательные возможности для изучения феномена аккреционного диска с облучением.

В результате интенсивного рентгеновского облучения аккреционного диска, над его поверхностью может сформироваться мощный горячий ($T \sim 10^6 \dots 10^7$ К) слой плазмы, который будем называть горячей атмосферой или короной. Наличие горячей атмосферы/короны над аккреционным диском серьезно влияет на широкий спектр наблюдательных характеристик ММРД. Однако ее параметры остаются плохо изученными. Наблюдательные оценки толщины аккреционного диска на внешнем крае выполнены в настоящее время для ограниченного числа систем. В то же время измерение геометрических параметров атмосферы над аккреционным диском важно для проверки физических моделей ее формирования.

Современные модели атмосферы над аккреционным диском имеют ряд существенных недостатков, что ограничивает их применение для объяснения наблюдений ММРД. В частности, в наилучших из имеющихся на сегодняшний день теоретических расчетах атмосферного слоя горячая атмосфера не рассчитывается самосогласованно с вертикальной структурой лежащего под ней холодного аккреционного диска. В диссертационной работе подробно исследуется вопрос влияния горячей атмосферы на прогрев оптически-толстого аккреционного диска.

С наблюдательной точки зрения отдельный интерес представляет задача измерения орбитальных параметров ММРД при помощи фотометрических оптических/инфракрасных наблюдений, поскольку эти данные часто являются основным источником информации о двойной системе. Оптическое и ИК-излучение большинства маломассивных рентгеновских двойных систем относительно слабо — подавляющая часть таких объектов в нашей Галактике имеет яркость слабее 17–18-й звездной величины. Поэтому измерение орбитальных параметров ММРД при помощи детальных спектрометрических измерений не всегда возможно. Однако потребность в таких оценках весьма велика, в особенности в связи с появлением и планированием высококачественных обзоров неба типа SDSS, UKIDSS, VVV и др.

Цель работы

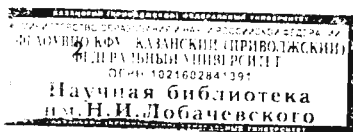
Целью настоящей работы является исследование влияния горячей атмосферы ($T \sim 10^6 \dots 10^7 \text{ K}$) на прогрев за счет облучения внешних частей оптически толстого аккреционного диска в маломассивных рентгеновских двойных системах и определение параметров аккреционного диска с атмосферой из оптических и рентгеновских наблюдений на примере двойной системы GS 1826-238.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми.

Сделан расчет вертикальной структуры внешних частей аккреционного диска вокруг нейтронной звезды с учетом облучения центральным рентгеновским источником и наличия над диском протяженной горячей атмосферы ($T \approx 2 \cdot 10^6 \text{ K}$). Показано, что на внешних радиусах ($R \gtrsim 10^{11} \text{ см}$), за счет рассеяния в атмосфере и диске, жесткое ($E \gtrsim 10 \text{ кэВ}$) рентгеновское излучение от центрального источника может прогревать все слои оптически толстого аккреционного диска. Показано, что в модели аккреционного диска с атмосферой можно объяснить наличие стационарных больших аккреционных дисков в долгопериодических ММРД GX 13+1, Cyg X-2, которые без влияния облучения должны были бы демонстрировать вспыхивающую активность.

Впервые измерен орбитальный период системы GS 1826-238 по периодическим модуляциям на оптической кривой блеска. Впервые показано, что основные наблюдательные характеристики двойной системы GS 1826-



238 в оптическом диапазоне удастся объяснить в рамках простой геометрической модели ММРД. Разработана методика совместного использования набора наблюдательных характеристик маломассивных рентгеновских двойных систем для измерения наклона орбиты, геометрических параметров аккреционного диска и времени переработки рентгеновского излучения в оптическое. На основе разработанной методики впервые получены оценки наклона системы и толщины атмосферы диска на внешнем крае для барстера GS 1826-238.

Впервые показано, что время оптического отклика системы GS 1826-238 на рентгеновский всплеск не согласуется с геометрической задержкой распространения рентгеновских фотонов в системе. Высказана гипотеза, что это указывает на конечное время переработки/переизлучения рентгеновских фотонов в горячей атмосфере над аккреционным диском.

Научная и практическая ценность работы

В диссертации исследовано влияние атмосферного слоя с параметрами, взятыми из современных теоретических расчетов атмосферы над внешними частями аккреционного диска, на вертикальную структуру аккреционного диска под фотосферой. Таким образом, сделан важный шаг к построению полностью самосогласованной модели аккреционного диска с формирующейся над ним атмосферой в ММРД.

В диссертации измерен орбитальный период двойной системы GS 1826-238 на фоне аperiodической переменности источника в оптическом диапазоне. Используемая здесь методика может быть применена для измерения орбитального периода других ММРД с похожим характером оптической переменности.

В диссертации разработана методика оценки наклона орбиты системы и толщины атмосферы диска на внешнем крае, на основе оптических и рентгеновских фотометрических наблюдений ММРД. Эта методика успешно апробирована на двойной системе GS 1826-238. Применение данной методики к как можно большему числу ММРД с известными оптическими и рентгеновскими характеристиками позволит, в перспективе, получить наблюдательные оценки толщины аккреционного диска с атмосферой для этих систем, что даст возможность поставить ограничения на теоретические модели атмосферного слоя над внешними частями диска в ММРД.

Найденная в диссертации дополнительная задержка переработки мягких рентгеновских фотонов в системе GS 1826-238 требует детального исследова-

дования при помощи теоретических моделей атмосферы. Таким образом можно будет уточнить механизм переработки рентгеновских фотонов в оптическое излучение в ММРД.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на семинарах и конференциях молодых ученых, проводимых в ИКИ РАН, Всероссийских конференциях "Астрофизика высоких энергий: сегодня и завтра" (Москва, 2009, 2010, 2011).

Полный список трудов диссертанта включает 9 работ в реферируемых журналах, из них 4 — по теме диссертации.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми глав, объединенных в две части, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертация имеет объем 150 страниц, содержит 32 иллюстрации и 8 таблиц.

Содержание работы

Первая часть диссертации посвящена исследованию вертикальной структуры внешних частей аккреционного диска в маломассивных рентгеновских двойных системах с учетом возможности рассеяния рентгеновских фотонов от центрального источника в аккреционном диске и атмосферном слое.

В первой главе получены простые аналитические выражения для величины нагрева диска рассеянными рентгеновскими фотонами, с использованием приближенного решения уравнения переноса по методу Соболева в плоско-параллельном слое конечной толщины. Показано, что данное приближение обладает $\lesssim 10\%$ точностью в диапазоне энергий рентгеновских фотонов $E < 20$ кэВ.

Во второй главе выполнен расчет вертикальной структуры внешних частей оптически толстого аккреционного α -диска вокруг нейтронной звезды, с учетом облучения рентгеновскими фотонами от центрального источника и возможности наличия над диском горячей атмосферы. Делаются выводы о влиянии горячей атмосферы на прогрев аккреционного диска.

0.1 L_{edd}

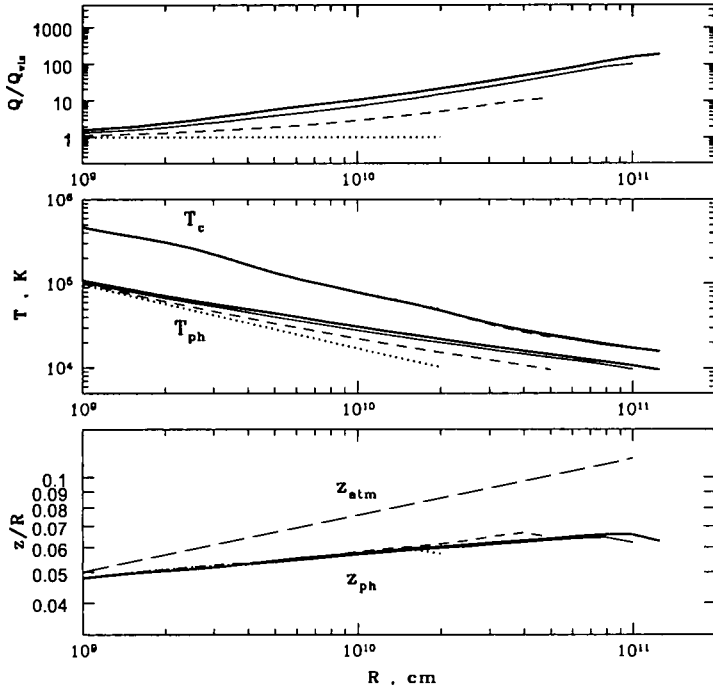


Рис. 1. Радиальная структура аккреционного диска с облучением для светимости центрального рентгеновского источника $L_X = 0,1 L_{\text{edd}}$. В верхнем ряду графиков показано отношение полного потока энергии в вертикальном направлении к потоку энергии только из-за вязкого нагрева Q/Q_{vis} на уровне фотосферы как функция радиуса R ; в среднем ряду — температура в центральной плоскости T_c и на фотосфере T_{ph} диска; в нижнем ряду — высота фотосферы z_{ph}/R и атмосферы z_{atm}/R . Толстая сплошная линия — облучение диска с полностью рассеивающей атмосферой, тонкая сплошная линия — облучение диска с атмосферой, где коэффициент поглощения равен коэффициенту рассеяния для фотонов с энергией $E \lesssim 10 \text{ кэВ}$, штриховая линия — облучение диска без атмосферы, пунктирная линия — диск без облучения.

Процесс рассеяния рентгеновских фотонов на свободных электронах существенно влияет на характер прогрева внешних радиусов аккреционного диска. Рентгеновские фотоны с энергией $E \gtrsim 10$ кэВ, падающие от центрального источника под небольшим углом к поверхности диска, испытывают рассеяние, могут проникать достаточно глубоко под фотосферу аккреционного диска и оказывать существенное влияние на его вертикальную структуру на внешних радиусах.

Эффект рассеяния рентгеновских фотонов оказывается особенно важен на больших радиусах, где полная поверхностная плотность аккреционного диска становится достаточно малой: $\Sigma_0 \lesssim 20$ г/см² (при этом диск еще остается оптически толстым: $\tau \gtrsim 100$). На радиусах $R \gtrsim 10^{11}$ см облучение может прогревать все слои оптически толстого диска, и его вертикальная структура становится практически изотермичной (рис.1).

Отмечается, что даже сильное облучение не оказывает существенного влияния на толщину диска по уровню фотосферы z_{ph} до радиуса, где начинается рекомбинация водорода (и, соответственно, происходит резкое уменьшение z_{ph} вместе с увеличением молекулярного веса вещества).

При облучении аккреционного диска с атмосферой, зона с неполной ионизацией водорода располагается значительно (в ~ 10 раз) дальше по радиусу, чем в аккреционном диске без облучения. Например, для близкой к эддингтоновской светимости центрального источника $L_X \approx L_{edd}$ внешний радиус стационарного диска с облучением может составлять $R \approx 6 \cdot 10^{11}$ см, что согласуется с оценками внешнего радиуса диска в долгопериодических стационарных ММРД GX 13+1, Cyg X-2.

Отмечается, что в модели облучения аккреционного диска с атмосферой естественным образом разрешается проблема нагрева внешних холодных ($T \lesssim 10^4$ К) неионизованных частей аккреционного диска, которые экранированы от прямых фотонов центрального рентгеновского источника.

Вторая часть диссертации посвящена определению характеристик аккреционного диска с атмосферой и орбитальных параметров ММРД по наблюдениям в оптическом и рентгеновском диапазонах на примере рентгеновской двойной системы GS 1826-238.

В первой главе дана краткая характеристика источника и сделан обзор оптических и рентгеновских наблюдений источника GS 1826-238, которые будут использованы для определения параметров системы. Также здесь представлены результаты анализа совместных оптических (RTT-150) и рентгеновских (RXTE) наблюдений барстера в сентябре-октябре 2003 г.

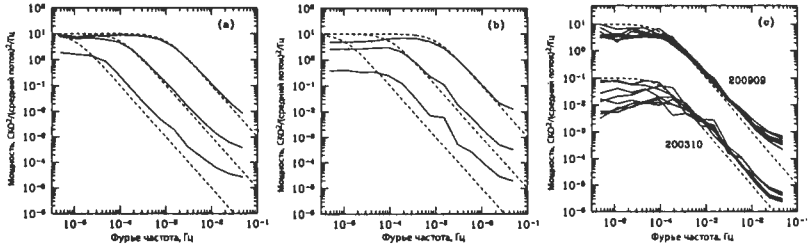


Рис. 2. Влияние пропусков в кривых блеска на измерение спектра мощности методом Лэмба-Скаргла по данным численного моделирования. Графики (а) и (б) показывают средние спектры мощности (сплошные линии), измеряемые по кривым блеска с пропусками для серий оптических наблюдений (а) 2003/09 и (б) 2003/10, для 3-х вариантов исходного спектра мощности $P_m(\nu)$ с изломом на частотах $\nu_{br} = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}$ Гц (штриховые линии). На графике (с) приведены спектры мощности, полученные для 8 случайно выбранных реализаций кривых блеска с пропусками для серии наблюдений 2003/09 или 2003/10, для модели исходного спектра мощности $P_m(\nu)$ с изломом на частоте $\nu_{br} = 10^{-4}$ Гц. Нормировки $P_m(\nu)$ выбраны так, чтобы спектры мощности для серий наблюдений 2003/09 и 2003/10 не перекрывались.

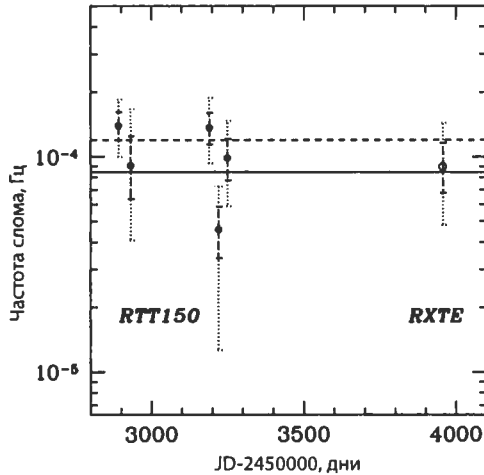


Рис. 3. Частота излома спектра мощности переменной источника GS 1826-238 по наблюдениям в оптическом и рентгеновском диапазонах. Закрашенные кружочки соответствуют оптическим наблюдениям RTT-150, незакрашенный символ — частота излома в рентгеновском спектре мощности по данным RXTE. Для каждой точки показаны 68% и 95% интервалы ошибок. Сплошной горизонтальной линией показана наилучшая оценка частоты излома по всем сериям оптических наблюдений, штриховой линией — без учета 4-й серии наблюдений.

Вторая глава посвящена определению орбитального периода барстера GS 1826-238 и анализу наблюдаемой низкочастотной переменности на его рентгеновской и оптической кривой блеска.

Оптическая и рентгеновская переменность GS 1826-238 носит аperiодический характер. Для анализа низкочастотной оптической и рентгеновской переменности объекта использовалась методика построения спектра мощности переменности источника на основе данных с большими пробелами в наблюдениях. Показано, что, несмотря на принципиальную возможность получения спектров мощности долгопериодической переменности источников по данным с пропусками, их влияние значительно осложняет анализ. Пробелы в кривой блеска объекта (например, пропуски между ночами наблюдений на оптической кривой блеска) вносят искажения в форму спектра мощности переменности (получаемого, например, методом Ломба-Скаргла).

Средний спектр мощности, измеренный по кривым блеска с пробелами, отличается от истинного спектра мощности внутренней переменности в источнике (рис.2). В случае, если переменность источника имеет характер красного шума $P(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$ ($\alpha > 1$), пробелы в кривой блеска приводят к появлению искусственной "полочки" в измеряемом спектре мощности на частотах ниже $\nu \sim 1/T_{PL}$ (T_{PL} — длина непрерывного участка кривой блеска).

Помимо искажения средней формы спектра мощности пропуски в наблюдениях увеличивают возможный разброс значений спектра мощности в каждой конкретной реализации кривой блеска, на частотах $\nu \lesssim 1/T_{PL}$. Для учета этих эффектов при измерении формы спектра мощности был использован метод численного моделирования (см. рис.2).

Спектр мощности переменности источника в диапазоне $10^{-5} \dots 10^{-2}$ Гц описывается степенным законом с выходом на константу на низких частотах. Формы спектра мощности оптической и рентгеновской переменности GS 1826-238 согласуются. Частота излома спектра мощности хорошо измеряется по оптическим данным (рис.3): $\nu_{br} = (8,48 \pm 0,14) \cdot 10^{-5}$ Гц (для значения степенного наклона спектра мощности выше излома $\alpha = 2$).

Орбитальный период системы GS 1826-238 измерен с высокой точностью, с использованием метода наложения эпох: $P_{orb} = (2,24940 \pm 0,00015)$ ч (рис.4). Периодические вариации на оптической кривой блеска имеют относительную амплитуду $A = 4,0\% \pm 0,6\%$ и могут быть связаны с эффектом прогрева оптической звезды рентгеновским излучением из центральных об-

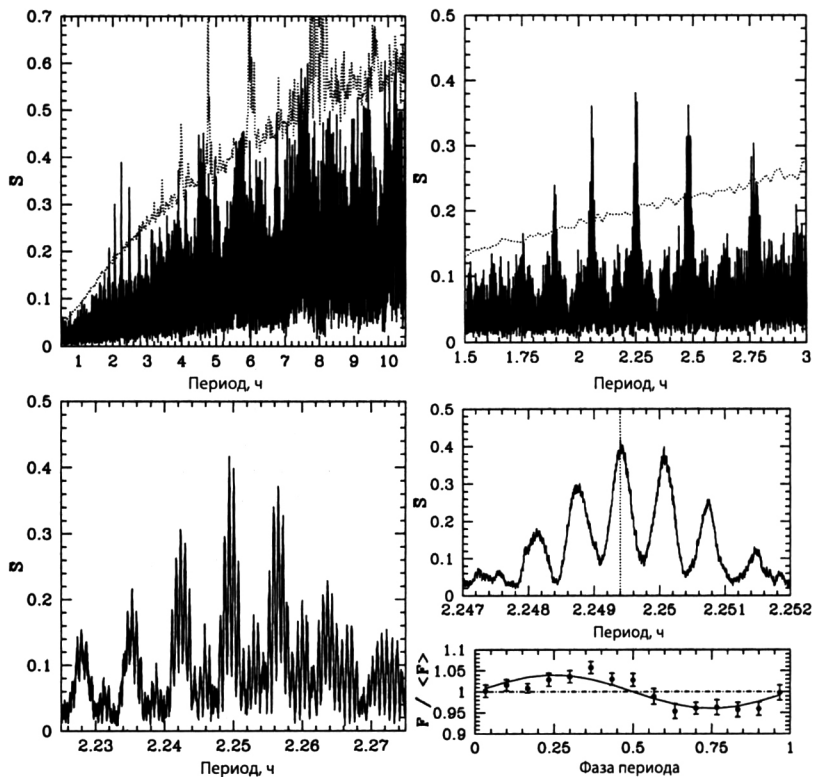


Рис. 4. Периодограмма метода наложения эпох для всех серий оптических наблюдений GS 1826-238, показанная в диапазоне периодов 0, 5...10, 5 ч (вверху, слева), 1, 5...3 ч (вверху, справа), 2, 225...2, 275 ч (внизу, слева), 2, 245...2, 255 ч (внизу, справа). Штриховыми линиями на верхних графиках показан уровень значимости 99,7%(3 σ). На нижнем правом графике показан наилучший период $P_{orb} = 2.24940$ ч (вертикальная пунктирная линия) и приведена соответствующая фазовая кривая.

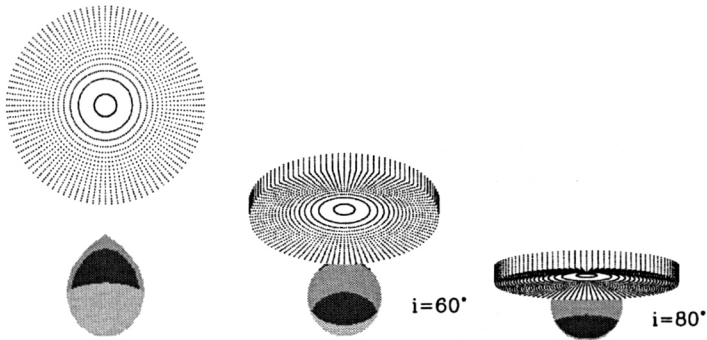


Рис. 5. Геометрическая модель GS 1826-238 (аккреционный диск и оптическая звезда) показана в проекции на картинную плоскость для орбитальной фазы $\phi = 0$ для трех значений наклона орбиты: $i = 0^\circ$ (слева), $i = 60^\circ$ (посередине), $i = 80^\circ$ (справа). Темные закрашенные области на рисунке соответствуют прогретым рентгеновским излучением частям оптической звезды.

ластей аккреционного диска.

Сделана оценка орбитального периода GS 1826-238 из аperiodической переменности на оптической кривой блеска с использованием корреляции $1/P_{orb} \propto \nu_{br}$, где ν_{br} — частота низкочастотного излома в спектре мощности переменности. В качестве реперных источников для калибровки зависимости были выбраны 2 ММРД с известными периодами: 1H 16267-273 ($P_{orb} = 0,69$ ч) и Sco X-1 ($P_{orb} = 18,92$ ч). Наилучшие оценки орбитального периода GS 1826-238 по частоте излома в спектре мощности составляют $P_{orb} \approx 8,0 \pm 4,2$ ч (по 1H 16267-273) и $P_{orb} \approx 2,6 \pm 0,6$ ч (при использовании в качестве реперного источника 1H 16267-273 и Sco X-1, соответственно), в хорошем согласии с точным значением периода.

В третьей главе суммированы наблюдательные характеристики двойной системы GS 1826-238 в оптическом и рентгеновском диапазонах.

В четвертой главе описана геометрическая модель ММРД (рис.5), используемая методика расчета оптического потока от двойной системы и оптического отклика на рентгеновскую вспышку (термоядерный всплеск на поверхности нейтронной звезды).

В пятой главе приведена методика оценки наклона i и толщины диска на внешнем крае $\frac{H_d}{R_d}$ из оптических и рентгеновских данных с использованием модели ММРД.

В шестой главе получены оценки наклона орбиты, толщины аккре-

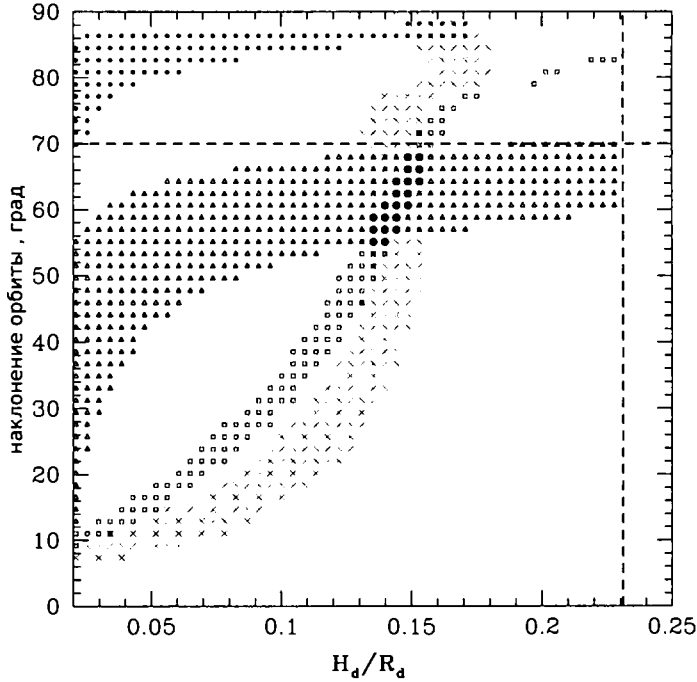


Рис. 6. Наилучшие ограничения на толщину диска на внешнем крае и наклонение орбиты системы GS 1826-238 (закрашенные большие круглые значки). Приведены ограничения сделанные на основе среднего оптического потока системы $\langle F_R \rangle$ (треугольники), абсолютной ΔF_R (крестики) и относительной Δm_R (квадратные значки) амплитуды периодических вариаций яркости на оптической кривой блеска и из формы оптического отклика на рентгеновский всплеск на фазе $\phi = 0$ (закрашенные маленькие круглые значки). Горизонтальная штриховая линия показывает верхний предел на наклонение орбиты системы: рентгеновский источник не является "дипером". Вертикальной штриховой линией отмечен верхний предел на толщину диска на внешнем крае, при котором оптическая звезда полностью попадает в область тени от аккреционного диска и не может облучаться рентгеновским излучением центрального источника.

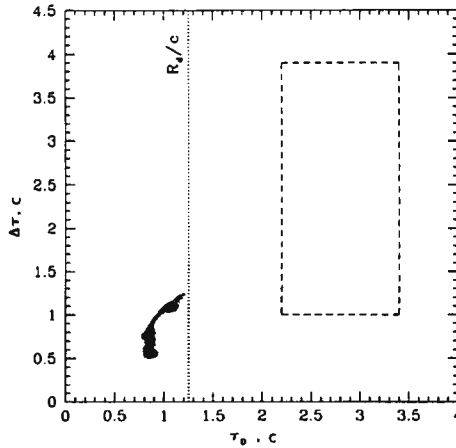


Рис. 7. Наблюдательные ограничения на параметры формы гауссовой функции отклика из одновременных оптических и рентгеновских наблюдений термоядерного всплеска барстера (штриховой прямоугольник). Одновременно приведена область значений τ_0 , $\Delta\tau$ (темная закрашенная область на графике), которая соответствует наилучшим параметрам модели GS 1826-238 для орбитальной фазы $\phi = 0$ (максимальная геометрическая задержка оптического отклика). Серая закрашенная область на графике соответствует ограничениям только из абсолютной амплитуды периодических вариаций ΔF_R на рис.6 (независимы от параметров модели аккреционного диска), при условии $i < 70^\circ$ и $\frac{H_d}{R_d} > 0,05$. Вертикальной пунктирной линией отмечен размер аккреционного диска GS 1826-238 в световых секундах.

ционного диска на внешнем крае и времени переработки рентгеновского излучения в оптическое на основе оптических и рентгеновских наблюдений барстера GS 1826-238.

Для барстера GS 1826-238, на основе данных о среднем оптическом потоке и амплитуде периодических модуляций на оптической кривой блеска, получены следующие оценки наклона системы и толщины атмосферы диска на внешнем крае: $i = 62,5 \pm 5,5^\circ$, $\frac{H_d}{R_d} = 0,145 \pm 0,009$ (рис.6).

Показано, что время оптического отклика системы GS 1826-238 на рентгеновский всплеск не согласуется с геометрической задержкой распространения рентгеновских фотонов в системе (рис.7). Делается вывод, что это указывает на конечное время, $1,0 \lesssim \tau_{repr} \lesssim 2,2$ с, переработки/переизлучения рентгеновских фотонов в горячей атмосфере над аккреционным диском.

В заключении приведены основные результаты диссертации выносимые на защиту.

Основные результаты, выносимые на защиту

- Сделан расчет вертикальной структуры внешних частей аккреционного диска с учетом облучения центральным рентгеновским источником и наличия над диском протяженной горячей атмосферы ($T_{atm} \approx 2 \cdot 10^6$ К). Показано, что на внешних радиусах ($R \gtrsim 10^{11}$ см) за счет рассеяния в атмосфере и диске жесткое рентгеновское излучение ($E \gtrsim 10$ кэВ) от центрального источника может прогревать все слои оптически толстого аккреционного диска, при этом вертикальная структура диска становится практически изотермичной. Влияние рассеяния в атмосфере оказывается недостаточным для существенного увеличения толщины диска по уровню фотосферы.
- Показано, что в модели аккреционного диска с атмосферой разрешается проблема нагрева внешних холодных неионизованных частей аккреционного диска, экранированных для прямых рентгеновских фотонов центрального источника. Радиус, на котором в диске появляется зона с неполной ионизацией водорода, возрастает в ~ 10 раз, по сравнению с диском без облучения. Это позволяет объяснить наличие стационарных больших аккреционных дисков в долгопериодических ММРД GX 13+1, Cyg X-2, которые без влияния облучения должны были бы демонстрировать вспыхивающую активность.
- Исследована оптическая переменность рентгеновского барстера GS 1826-238. В спектре мощности оптической переменности найден излом на частоте $\nu_{br} = (8,48 \pm 0,14) \cdot 10^{-5}$ Гц, что позволило сделать оценку орбитального периода GS 1826-238 из апериодической переменности на оптической кривой блеска с использованием корреляции $1/P_{orb} \propto \nu_{br}$.
- Измерен орбитальный период системы GS 1826-238 по периодическим модуляциям на оптической кривой блеска: $P_{orb} = (2,24940 \pm 0,00015)$ ч.
- Показано, что основные наблюдательные характеристики двойной системы GS 1826-238 в оптическом диапазоне удается объяснить в рамках простой геометрической модели ММРД, построенной в диссертационной работе. Показаны возможности совместного использования набора наблюдаемых характеристик маломассивных рентгеновских двойных систем для измерения наклона орбиты, геометрических параметров аккреционного диска и времени переработки рентгеновского излучения в оптическое.

- С использованием геометрической модели ММРД получены оценки наклонения системы и толщины атмосферы диска на внешнем крае для барстера GS 1826-238: $i = 62 \pm 6^\circ$, $\frac{H_d}{R_d} = 0,14 \pm 0,01$.
- Показано, что время оптического отклика системы GS 1826-238 на рентгеновский всплеск не согласуется с геометрической задержкой распространения рентгеновских фотонов в системе. Сделан вывод, что это указывает на конечное время, $1,0 \lesssim \tau_{\text{геом}} \lesssim 2,2$ с, переработки/переизлучения рентгеновских фотонов в горячей атмосфере над аккреционным диском.

Список публикаций по теме диссертации

1. Мещеряков А. В., Хамитов И., Ревнивцев М. Г., Буренин Р. А., Гильфанов М. Р., Павлинский М. Н., Сюняев Р. А., Аслан З., Гогуш Е., *Оптические и рентгеновские наблюдения термоядерных всплесков барстера GS 1826-24 в сентябре-октябре 2003 г.* // Письма в Астрономический журнал, 2004, т.11, с.827
2. Мещеряков А. В., Ревнивцев М. Г., Павлинский М. Н., Хамитов И., Бикмаев И. Ф. *Измерение орбитального периода рентгеновского барстера GS 1826-238 по наблюдениям вариаций его оптического блеска* // Письма в Астрономический журнал, 2010, т.36, с.777
3. Мещеряков А. В., Шакура Н. И., Сулейманов В. Ф. *Вертикальная структура внешних частей аккреционного диска в стационарных маломассивных рентгеновских двойных системах* // Письма в Астрономический журнал, 2011, т.37, с.343
4. Мещеряков А. В., Ревнивцев М. Г., Филиппова Е. В. *Параметры облученных аккреционных дисков по результатам оптических и рентгеновских наблюдений на примере GS 1826-238* // Письма в Астрономический журнал, 2011, т.37, с.892

Подписано в печать: 14.11.2011

Заказ № 6328 Тираж - 100 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru

